

Efecto de diferentes fuentes de nitrógeno en la emisión de óxido nitroso en plantaciones de café en Costa Rica

Effect of Different Nitrogen Sources on the Emission of Nitrous Oxide in Coffee Plantations in Costa Rica

Johnny Montenegro¹

[Recibido: 4 de febrero 2020, Aceptado: 10 de mayo 2020, Corregido: 15 de mayo 2020, Publicado: 1 de julio 2020]

Resumen

[Introducción]: Los sistemas de producción agrícola emiten gases con efecto invernadero, por la aplicación de nitrógeno, para incrementar la producción. **[Objetivo]:** Se cuantificó y comparó la emisión de N₂O resultante de aplicar diferentes fuentes de nitrógeno (nitrato de amonio (NH₄NO₃), nitrato de calcio (CaNO₃), urea convencional (CO(NH₂)₂), y recubierta con polímeros, RP). **[Metodología]:** Se aplicaron 250 kg de nitrógeno ha⁻¹ año⁻¹ de cada fuente a plantaciones de café ubicadas en dos zonas productoras de Costa Rica. La recolección de muestras gaseosas se realizó durante todo un año agrícola, utilizándose la técnica de la cámara estática. Se implementó un diseño de bloques completamente al azar con arreglo en parcelas divididas. **[Resultados]:** El patrón de emisión mostró que, en Naranjo, los mayores eventos se determinaron luego de fertilizar en junio, razón por la cual la emisión fue mayor (P<0.0005) que la determinada en San Marcos de Tarrazú. La emisión anual en Naranjo fue mayor con nitrato de amonio y la menor (P<0.05) con la urea convencional, mientras que en San Marcos de Tarrazú no hubo diferencias importantes. La humedad del suelo, expresada como espacio poroso lleno de agua, no tuvo efectos importantes en la emisión, debido a que en términos promedio fueron inferiores a 60 %. **[Conclusiones]:** Los factores de emisión determinados fueron menores al sugerido por el IPCC, y estuvieron en el rango de 0.25 % a 0.40 % del nitrógeno aplicado. Se demuestra la importancia de realizar este tipo de investigación, para determinar la emisión de GEI de acuerdo con las condiciones propias, donde se desarrollan las actividades agrícolas del trópico.

Palabras clave: Cambio climático; cultivos tropicales; fertilización nitrogenada; gases efecto invernadero; trópico.

Abstract

[Introduction]: Agricultural production systems emit greenhouse gases from the application of nitrogen to increase production. **[Objective]:** To quantify and compare the emission of N₂O resulting from the application of different nitrogen sources (ammonium nitrate (NH₄NO₃), calcium nitrate (CaNO₃), conventional urea (CO(NH₂)₂), and polymer-coated urea (RP)). **[Methodology]:** 250 kg of nitrogen ha⁻¹ year⁻¹ was applied to coffee plantations located in two different producing areas of Costa Rica. Gaseous samples were collected during a whole agricultural year using the static camera technique. A completely random block design with a split-plot arrangement was implemented. **[Results]:** The emission pattern showed that, in Naranjo, the largest events were determined after the fertilization carried out in June; the emission in that community was higher (P<0.0005) than the one determined in San

¹ Investigador en cambio climático y agricultura, Convenio Instituto Nacional de Innovación y Transferencia en Tecnología Agropecuaria (INTA) e Instituto Meteorológico Nacional (IMN), Costa Rica; jmontenegro@inta.go.cr / jmontenegro@imn.ac.cr; <https://orcid.org/0000-0001-8526-570X>



Marcos of Tarrazú. The annual emission in Naranjo was higher with ammonium nitrate, and the lowest ($P < 0.05$) with conventional urea; while in San Marcos de Tarrazú, there were no significant differences between nitrogen sources. Soil moisture, expressed as water-filled porous space, had no significant effects on the emission because, on average, it was less than 60 %. [Conclusions]: The emission factors determined were lower than that suggested by the IPCC, and were in the range of 0.25% to 0.40% of the applied nitrogen. The importance of conducting this type of research is demonstrated to determine the GHG emission, according to the soil and climatic conditions in which the tropical agricultural activities are developed.

Keywords: Climate change; greenhouse gases; nitrogen fertilization; tropical crops; tropic.

1. Introducción

El calentamiento global, causado por el incremento de la concentración de gases con efecto invernadero (GEI) en la atmósfera, es el responsable del cambio climático que experimentamos actualmente, razón por la cual es necesaria la búsqueda de alternativas para reducir la emisión de estos gases de las diferentes fuentes.

Los sistemas de producción agrícola se encuentran dentro de las actividades humanas que emiten gases con efecto invernadero a la atmósfera. Si bien esos gases se generan como consecuencia de diferentes procesos naturales que ocurren por la acción de los microorganismos del suelo, algunos de ellos son estimulados por diferentes prácticas agrícolas realizadas durante el proceso productivo, tal como la fertilización nitrogenada (Akiyama *et al.*, 2000).

En Costa Rica, de acuerdo con información del Inventario Nacional de Gases de Efecto Invernadero del 2012, realizado por el Instituto Meteorológico Nacional (Chacón *et al.*, 2012), el óxido nitroso (N_2O) representó el 24 % de la emisión total del sector agropecuario cuando se considera como CO_2 equivalente.

Una parte significativa de esta emisión se produce como resultado de la aplicación de fertilizantes nitrogenados, práctica común en el sector cafetalero costarricense que, al igual que en otras actividades pecuarias y agrícolas, se utiliza para estimular e incrementar los rendimientos productivos. Sin embargo, este insumo también contribuye con la emisión de N_2O , un poderoso gas con efecto invernadero que tiene gran potencial de calentamiento (IPCC, 2006).

Según el IPCC (2006), para estimar la emisión del óxido nitroso como consecuencia de la aplicación de nitrógeno al suelo se sugiere utilizar el 1 % del total aplicado al suelo, independientemente del cultivo, región o fuente de nitrógeno utilizada. Sin embargo, diferentes investigaciones (Grace *et al.*, 2016, Harty *et al.*, 2016; Signor y Pellegrino, 2013) han reportado menores y mayores porcentajes que el sugerido para estimar la emisión de este gas cuando se fertiliza con nitrógeno.

El N_2O se produce como resultado de los procesos de nitrificación (la oxidación de NH_4^+ a NO_3^-) y denitrificación (la reducción del NO_3^- a N_2O gaseoso), mediados por microorganismos del suelo, que son estimulados, entre otros factores, por condiciones de suelo, clima, y cantidad de fertilizante aplicado (Farquharson, 2016; Signor y Pellegrino, 2013).

En Costa Rica se han realizado pocas investigaciones para la determinación de la emisión del N_2O en el cultivo del café; las disponibles han caracterizado el patrón de emisión y



cuantificado su magnitud anual utilizando solo una dosis y fuente de nitrógeno (Hergoualc'h *et al.*, 2008; Montenegro y Abarca, 2001; Montenegro y Herrera, 2013), y no existe información comparativa del efecto de diferentes fuentes de nitrógeno en la emisión de este gas, por lo que se hace necesario el desarrollo de experimentación tendiente a la obtención de este tipo de datos.

Previas investigaciones realizadas en otras latitudes y diferentes cultivos han reportado resultados contrastantes cuando se ha determinado la emisión de N₂O derivada de distintas fuentes de nitrógeno utilizadas como fertilizante. Diferencias en la emisión de este gas como resultado de la fertilización con distintas fuentes de nitrógeno fueron señaladas por Velthof *et al.* (1996) en Holanda; de Klein *et al.* (2001) en Europa, Estados Unidos y Nueva Zelanda; Dobbie y Smith (2003) en Escocia, y Halvorson *et al.* (2010) en Colorado, Estados Unidos. Sin embargo, Burton *et al.* (2008) en Canadá no determinaron diferencias en la emisión de este gas con diferentes fuentes de nitrógeno. Igual tendencia fue reportada por Sistani *et al.* (2011) en Kentucky, Estados Unidos.

Por lo anteriormente expuesto, y considerando que en no existe información en Costa Rica del efecto de la aplicación y comparación de diferentes fuentes de nitrógeno en la emisión del N₂O, los objetivos de esta investigación fueron cuantificar y comparar la emisión de N₂O resultante de la aplicación de cuatro fuentes de fertilizante nitrogenado al cultivo de café, y generar información que sirva de base para el desarrollo de opciones de mitigación en este cultivo, asociadas a la utilización de diferentes fuentes de nitrógeno.

2. Metodología

2.1 Ubicación y zona de vida

Las investigaciones se desarrollaron en dos fincas de café seleccionadas por su representatividad, las que fueron definidas por personal técnico del ICAFE: una ubicada en la región productora del Valle Occidental, específicamente en Naranjo, y la otra en la región productora de Los Santos, en San Marcos de Tarrazú, Costa Rica.

La escogencia de estas regiones para el desarrollo de las evaluaciones se basó en el hecho de que el área de cultivo de esta especie en las regiones antes mencionadas representa aproximadamente el 50 % del área nacional con esta importante actividad agrícola. En ambas regiones se implementó la misma investigación para determinar la emisión de óxido nitroso derivado de la aplicación de diferentes fuentes de nitrógeno.

La zona de vida en **Naranjo** se clasifica como bosque húmedo premontano, con temperatura y precipitación media anual de 21°C y 2 200 mm, con un período seco definido que, en términos generales, se extiende desde diciembre hasta finales de abril. En el caso de **San Marcos de Tarrazú**, la zona de vida es de bosque muy húmedo premontano, con temperatura y precipitación media anual de 16°C y 2 223 mm, caracterizada por tener un período seco que se extiende desde diciembre y hasta finales de abril (Holdriedge, 1996).



2.2 Suelos

Los suelos en Naranjo se clasifican como del orden Andisoles, suborden Ustands, gran grupo Haplustands, y subgrupo Dystric Haplustands, ácidos (pH alrededor de 5.0), franco arcilloso y de relieve ondulado (Alvarado *et al.*, 2001). En San Marcos de Tarrazú los suelos se clasifican como: orden Ultisoles, suborden Humults, gran grupo Palehumults, y subgrupo Aquic Palehumults, ácidos (pH alrededor de 5.0), arcillosos, moderadamente bien drenados, y de relieve ondulado (Chinchilla, Mata, y Alvarado, 2011).

2.3 Manejo de la plantación

En ambas regiones y para las fincas donde se realizaron las evaluaciones, todas las prácticas agrícolas aplicadas a la plantación de café durante la fase experimental se mantuvieron de acuerdo con el manejo tradicional de esta plantación. Estas incluyeron desde el control de malezas, hasta la regulación de la sombra, pasando por la aplicación de cualquier producto químico utilizado para el control de problemas fitosanitarios.

En ambas regiones la plantación de café, bajo sombra regulada de guaba (*Inga* spp) y poró (*Erythrina* spp), tuvo una densidad de 5 848 plantas ha⁻¹ (0.9 m * 1.9 m) de la variedad catuai, con 7 años de plantada en Naranjo y 15 años en San Marcos de Tarrazú.

2.4 Manejo experimental

2.4.1 Flujo de emisión del óxido nitroso del suelo

Previo al inicio de las evaluaciones experimentales, se realizó un muestreo de gases para tipificar el flujo de emisión del óxido nitroso. Para ello se colocaron seis cámaras estáticas en las parcelas donde se implementaría el experimento, y se recolectaron muestras gaseosas de estas mismas a partir del momento en que se colocaron sobre el suelo y, cada 15 minutos hasta completar 45 minutos de muestreo. De acuerdo con el comportamiento del flujo de emisión resultante de estos muestreos, se determinó la cantidad de muestras a recolectar de cada cámara cada día de muestreo durante el período de evaluación de los experimentos antes señalados.

2.4.2 Fertilización

En esta evaluación se realizaron tres eventos de fertilización en el ciclo anual del cultivo, los cuales se efectuaron de acuerdo con la práctica y época normal de aplicación de fertilizante en las regiones donde se ubican las fincas donde se implementaron los experimentos. Las fechas de aplicación del fertilizante fueron (entre paréntesis la fecha de fertilización) en Naranjo: 1) 1ª semana de junio del 2016 (30 de mayo); 2) 3ª semana de agosto del 2016 (16 de agosto); 3) 3ª semana de octubre del 2016 (18 de octubre). En San Marcos de Tarrazú la implementación de los ensayos en el campo se realizó en agosto, por lo que las fertilizaciones se realizaron: 1) 3ª semana de agosto del 2016 (23 de agosto); 2) 1ª semana de noviembre del 2016 (01 de noviembre); 3) 2ª semana de junio del 2017 (13 de junio).



2.4.3 Tamaño de parcela

Las parcelas experimentales estuvieron conformadas cada una por cinco hileras y cinco plantas por hilera, para un total de 25 plantas por parcela; la parcela útil la constituyeron las 15 plantas centrales, lugar donde se realizaron los muestreos y se recolectaron las muestras de gas con el N₂O.

2.4.4 Tratamientos

Se evaluaron como opciones de mitigación cuatro diferentes fuentes de nitrógeno (**Cuadro 1**), todas aplicadas a 250 kg ha⁻¹.

Cuadro 1. Tratamientos, fórmula y nombre del compuesto nitrogenado evaluado en plantaciones de café
Table 1. Treatments, formula and name of the nitrogenous compound evaluated in coffee plantations

Tratamiento	Fórmula	Nombre del compuesto nitrogenado aplicado
T1	NH ₄ NO ₃	Nitrato y amonio
T2	CaNO ₃	Nitrato de calcio
T3	CO(NH ₂) ₂	Urea convencional
T4	CO(NH ₂) ₂	Urea recubierta con polímeros (RP)

El fertilizante se aplicó de forma manual a la base de la planta de café, donde se colocó la dosis completa y correspondiente a cada uno de los eventos de fertilización programado (**Cuadro 2**) y se midió el largo (cm) y ancho (cm) de la banda fertilizada.

Cuadro 2. Tratamientos, dosis anual y, cantidad aplicada de nitrógeno según evento de fertilización
Table 2. Treatments, annual dose, and applied amount of nitrogen according to fertilization event

Tratamiento	Dosis anual kg N ha ⁻¹	1 ^a *	2 ^a * kg N ha ⁻¹	3 ^a *
T1	250	83	83	83
T2	250	83	83	83
T3	250	83	83	83
T4	250	83	83	83

* Evento de fertilización

2.4.5 Muestreo de óxido nitroso

Previo al inicio de las evaluaciones, se realizó la determinación del flujo de emisión de este gas. Se encontró que, con la recolección de dos muestras de gas en cada cámara, una al momento de colocarla en el campo y otra al final de tiempo estipulado de muestreo (45 minutos), era suficiente para calcular el flujo de emisión de N₂O. El flujo de emisión expresado como incremento de la concentración del N₂O en la cámara, en función de tiempo, mostró tendencia lineal (Montenegro 2019).

Las determinaciones de la emisión de óxido nitroso en el campo se iniciaron el día siguiente del evento de fertilización, y se continuaron durante todo el año agrícola. La primera medición en Naranja



se realizó el 31 de mayo del 2016 y la última el 23 de mayo del 2017, mientras que en San Marcos de Tarrazú el primer muestreo se efectuó el 24 de agosto del 2016 y se finalizó el 19 de julio del 2017.

La recolección de las muestras gaseosas se realizó considerando que mayores emisiones se presentan durante los primeros días luego de la aplicación del fertilizante, razón por la cual los muestreos fueron más frecuentes los primeros días después de aplicado el fertilizante para ir disminuyendo la frecuencia de estos mismos conforme avanzó el tiempo de muestreo. Se muestreó los días 1, 2, 3, 4, 7, 9, 11, 15, 18, y 23 días después de aplicado el fertilizante. A partir de ese momento, los muestreos se realizaron cada 15 días hasta el siguiente ciclo de fertilización.

Para capturar el gas emitido por el suelo, se utilizó la técnica de la cámara estática, se colocaron cámaras en la banda de fertilización y en la no fertilizada. Se recolectaron 12 muestras de gas por tratamiento, para un total de 48 muestras diarias en cada finca donde se implementó este experimento. Todos los muestreos se realizaron entre las 8 a.m. y las 12 p.m.

Con una jeringa se recolectó una muestra de gas de la cámara y se trasladó a un vial de 20 ml. previamente identificado y al vacío. Las muestras gaseosas fueron analizadas en el Laboratorio de Suelos del Instituto Nacional de Innovación y Transferencia en Tecnología Agropecuaria (INTA), para lo cual se utilizó un cromatógrafo de gases Agilent (modelo 7890A; Santa Clara, CA, Estados Unidos), equipado con dos detectores: ionización de llama y captura de electrones.

La concentración de N_2O en las muestras gaseosas se determinó por interpolación, a partir de curvas de calibración, construida con estándares de concentración conocida y trazable a NIST (Scott-Marrin, Inc., Ca.); como control de calidad se utilizaron muestras estándar, las cuales se analizaron intercaladamente con las muestras provenientes del campo.

2.4.6 Muestreo del suelo

Para determinar el efecto de la humedad del suelo en la emisión del óxido nitroso se recolectaron muestras 0-10 cm de profundidad, a la par de cada una de las cámaras estáticas y en cada una de las parcelas experimentales, para lo cual se utilizó un barreno. Una parte de cada muestra de suelo se depositó en bolsas plásticas previamente identificadas, que fueron trasladadas al laboratorio de suelos del Centro de Investigaciones en café (CICAFE) del ICAFE (Instituto del Café de Costa Rica), ubicado en Santa Bárbara de Heredia, donde se determinó la humedad por gravimetría. Los muestreos fueron realizados el mismo día que se recolectaron las muestras de gas.

Los resultados de la humedad gravimétrica se utilizaron, de manera conjunta con la densidad aparente, para determinar el espacio poroso lleno de agua (EPA), forma en la cual es reportado el contenido de humedad del suelo. El EPA utiliza una escala de 0 (suelo completamente seco) a 100 (suelo sobresaturado de agua), en el cual entre 30 (punto de marchites permanente) y 60 (capacidad de campo) se encuentra el agua disponible para las plantas, condición que se asocia con adecuados contenidos de humedad y oxígeno para la actividad microbiana del suelo. En consecuencia, cuando los valores de EPA sobrepasan 60, se incrementa la limitación de oxígeno del suelo y, con ello, se favorecen las condiciones para la formación del N_2O (Linn y Doran, 1984).



Otra parte de la muestra de suelo se utilizó para determinar el contenido de nitrato (NO_3^-) y de amonio (NH_4^+), para lo cual se utilizaron electrodos selectivos Oakton®. La determinación de amonio no se realizó durante la primera fertilización en San Marcos de Tarrazú.

Finalmente, la temperatura del suelo se determinó para la misma profundidad referenciada anteriormente, y para ello se utilizó un termómetro digital.

2.4.7 Diseño experimental y análisis estadístico

En ambas fincas se implementaron bloques completos al azar, con cuatro tratamientos (fuentes de nitrógeno aplicado) y tres repeticiones. El análisis estadístico se realizó con un diseño de bloques completamente al azar con arreglo en parcelas divididas; para la comparación de medias se utilizó la prueba de Tuckey en Infostat (Di Rienzo *et al.*, 2018).

3. Resultados

3.1 Patrón de emisión

El patrón de emisión del N_2O proveniente de las diferentes fuentes de nitrógeno evaluadas mostró un comportamiento similar; durante los primeros días, luego del evento de fertilización realizado en junio, fue donde se presentaron las mayores emisiones, para mostrar, posteriormente, valores basales (**Figura 1**). Naranjo presentó las mayores emisiones luego de la primera fertilización, independientemente de la fuente de nitrógeno aplicada (**Figuras 1a, 1c, 1e, 1g**).

No es claro el efecto de la lluvia en la emisión de este gas, pues, en el caso de Naranjo, con la excepción de los picos de emisión que se detectaron inmediatamente luego de la primera fertilización y que coinciden con eventos lluviosos, en las restantes fertilizaciones no se presentaron incrementos importantes de la emisión, aun cuando la lluvia estuvo presente (**Figura 1**).

En la localidad de San Marcos de Tarrazú, al igual que en Naranjo, en la fertilización realizada en junio se observó el mismo comportamiento anterior; pero solamente cuando se aplicó NH_4NO_3 , y no se observó efecto marcado de la precipitación en los restantes eventos de emisión del N_2O .

Lo anterior está relacionado con la cantidad de agua presente en el suelo (expresado como espacio poroso lleno de agua, EPA), la cual, en promedio, durante la estación lluviosa solamente en pocas ocasiones sobrepasó el punto de saturación 60 % del EPA, en Naranjo (**Figura 1i**), y no alcanzó este valor en San Marcos de Tarrazú (**Figura 1j**).

En Naranjo, el aumento de la humedad del suelo, resultado del inicio de la época lluviosa en la última semana de mayo, incrementó la actividad microbiana en el suelo y, con ello, también la descomposición de la materia orgánica del suelo y la liberación de nitrógeno contenido en esta (Hergoualc'h *et al.*, 2008; Montenegro y Abarca, 2001; Montenegro y Herrera, 2013). Aumentó la disponibilidad de precursores en el suelo. Ello, aunado a la fertilización realizada, provocó el incremento observado en la emisión del N_2O .



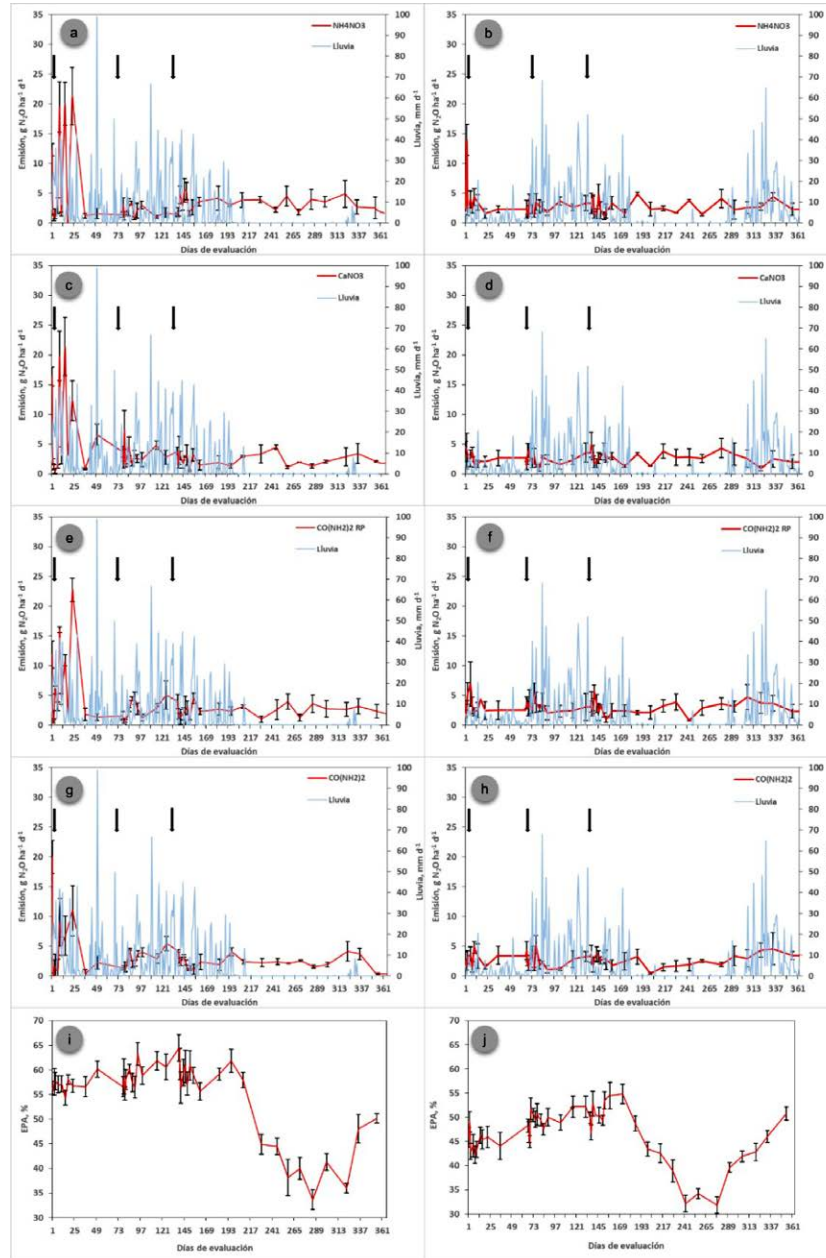


Figura 1. Patrón de emisión del N_2O y humedad del suelo con diferentes fuentes de nitrógeno aplicadas a plantaciones de café bajo sombra en Naranjo (a, c, e, g, i) y San Marcos de Tarrazú (b, d, f, h, j). Costa Rica. Valores promedio \pm 1 EE, flechas indican evento de fertilización, EPA: espacio poroso lleno de agua.

Figure 1. N_2O emission pattern and soil moisture with different nitrogen sources applied to shade coffee plantations in Naranjo (a, c, e, g, i) and San Marcos de Tarrazú (b, d, f, h, j). Costa Rica. Average values \pm 1 SD, arrows indicate fertilization event, EPA: pore space filled with water.



En el caso de San Marcos de Tarrazú, la situación es diferente. En esta comunidad la época lluviosa se inició aproximadamente 40 días antes de la fertilización que típicamente se realiza en junio, por lo que no coincide el incremento de la actividad microbiana con la fertilización y ello explica, en parte, por qué no se presentaron picos de emisión importante (**Figura 1**).

En términos generales, luego de pasada la influencia de la aplicación de los fertilizantes nitrogenados, la emisión de este gas es baja y se mantiene con ligeras oscilaciones en el tiempo en valores que se pueden considerar basales ($< 5 \text{ g N}_2\text{O ha}^{-1} \text{ d}^{-1}$).

Un aspecto a resaltar es el comportamiento de la emisión con la primera fertilización que se realizó en junio. Diferentes investigaciones (Montenegro y Herrera, 2012; Hergoualc'h *et al.*, 2008) muestran que en el cultivo de café las mayores emisiones de N_2O ocurren luego de la primera fertilización, probablemente por el efecto combinado del fertilizante aplicado con el incremento de la actividad microbiana del suelo debido al inicio de las lluvias, lo cual conduce al incremento de la descomposición de la materia orgánica acumulada durante el periodo seco. Esta situación es clara en Naranjo, donde los valores de emisión del N_2O en la primera fertilización fueron mayores que en los dos restantes, a pesar de aplicarse la misma cantidad de nitrógeno en cada uno de ellos.

En este sentido, la materia orgánica puede generar emisiones de N_2O por procesos como la descomposición (Thangarajan *et al.*, 2013), ocurrida por la demanda microbiana de ciertos elementos, y libera CO_2 y N (Fontaine *et al.*, 2004), posteriormente expuestos a nitrificación y desnitrificación.

En San Marcos de Tarrazú, la fertilización se realizó después de más de 40 días de iniciada la época lluviosa, por lo que se hipotetiza que el incremento de la actividad microbiana, con el aumento de la humedad del suelo y la subsecuente amonificación del N contenido en la fracción rápidamente degradable de la materia orgánica, el cual es absorbido rápidamente por las plantas de café, hace que cuando se aplicó el fertilizante nitrogenado no se presente el efecto combinado de las dos fuentes de N y, en consecuencia, la emisión de N_2O fue menor que la determinada en Naranjo. Otros aspectos relacionados con las características del suelo en ambas regiones también explican esta diferencia en la emisión.

Sin embargo, si se considera como válida la anterior hipótesis, esto sugiere como posible estrategia para reducir la emisión de este gas derivado del N aplicado como fertilizante, específicamente para la primera aplicación que con normalidad se realiza muy rápidamente con el inicio de la estación lluviosa, que sería aconsejable realizarla al menos un mes después de que se haya establecido la época lluviosa. Ello evitaría la coincidencia de las dos fuentes de nitrógeno y reduciría el exceso de este nutrimento en el suelo, lo cual es clave para disminuir la formación y emisión de este gas. Se demuestra, así, que, de no existir N en exceso, aunque otros factores del suelo muestren condiciones para que se genere el N_2O , la emisión se mantendrá en niveles basales.



3.2 Relación del N₂O con algunas variables del suelo

La temperatura del suelo fue relativamente constante (**Figura 2**), y no influyó la emisión del óxido nitroso, aunque en Naranjo, donde la temperatura promedio fue 1.1 °C superior a la determinada en San Marcos de Tarrazú, la emisión del N₂O fue superior (**Cuadro 3**).

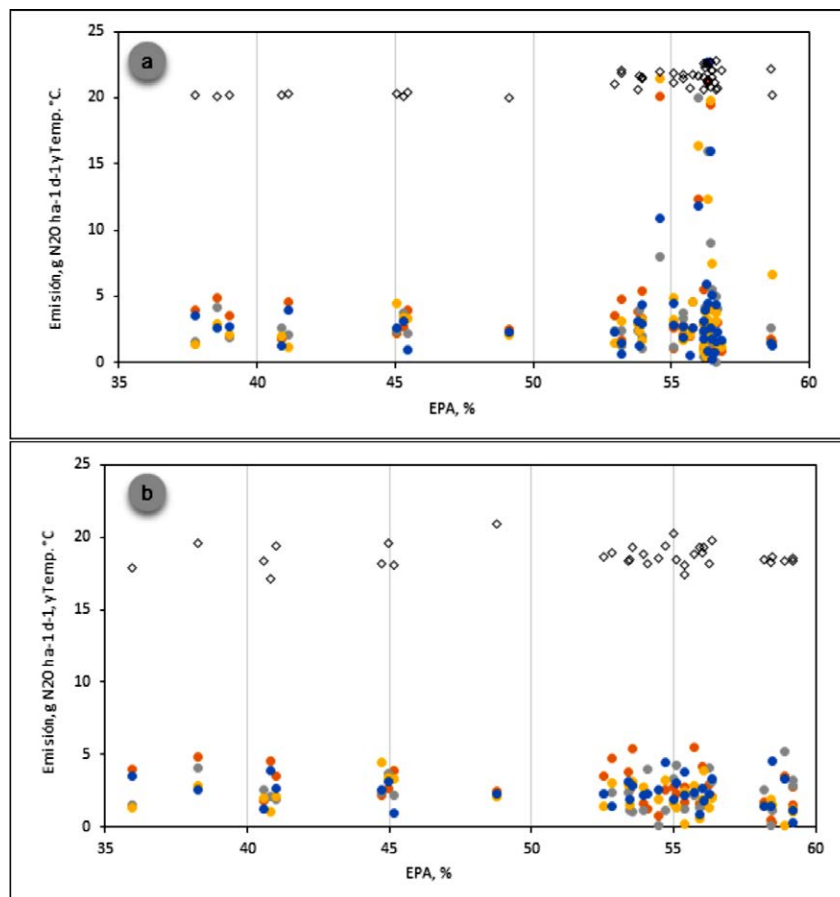


Figura 2. Emisión de N₂O (círculos) y temperatura del suelo (rombos), según contenido de humedad del suelo (EPA) determinados con diferentes fuentes de nitrógeno aplicadas a plantaciones de café bajo sombra en (a) Naranjo y (b) San Marcos de Tarrazú. Costa Rica.

Figure 2. N₂O emission (circles) and soil temperature (diamonds), according to soil moisture content (EPA) determined with different nitrogen sources applied to shade coffee plantations in (a) Naranjo and (b) San Marcos from Tarrazú. Costa Rica.

La humedad del suelo (EPA, %) tampoco mostró ser factor de influencia para la emisión de este gas, pues los valores de emisión fueron muy similares en el rango de humedad determinado en ambas comunidades (**Figura 2**). Los picos de emisión que se detectaron entre 54 y 57 % de EPA, en Naranjo, corresponden a eventos de fertilización, y muestran que la disponibilidad de nitrógeno en el suelo es muy importante para que se presente la emisión de este gas.



Los contenidos de nitratos en el suelo variaron a lo largo de la evaluación; mostraron, independientemente de la fuente de nitrógeno aplicada, mayor concentración inmediatamente después de los eventos de fertilización (**Figura 3**).

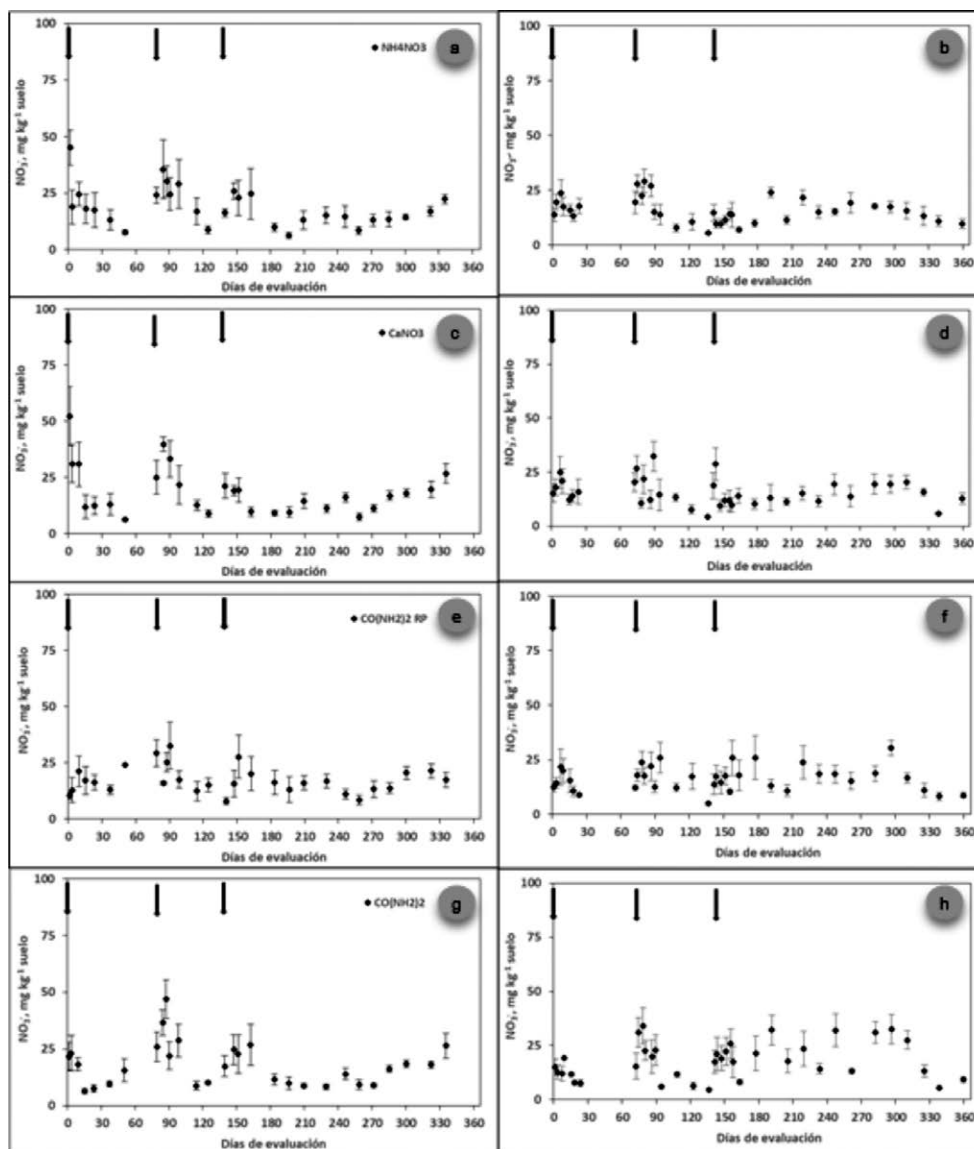


Figura 3. Contenido de nitratos del suelo con diferentes fuentes de N aplicadas a plantaciones de café bajo sombra en Naranjo (a, c, e, g) y San Marcos de Tarrazú (b, d, f, h). Costa Rica. Valores promedio \pm 1 EE, flechas indican evento de fertilización.

Figure 3. Soil nitrate content with different N sources applied to shade coffee plantations in Naranjo (a, c, e, g) and San Marcos de Tarrazú (b, d, f, h). Costa Rica. Average values \pm 1 SD, arrows indicate fertilization event.



Se puede apreciar que, cuando la fuente de nitrógeno contiene nitrato, los valores de este compuesto nitrogenado en el suelo tienden a ser mayores (**Figuras 3a, 3b, 3c, 3d**). Sin embargo, para todas las fuentes y en ambas localidades, no se determinó correlación ($P > 0.05$) entre este compuesto y la emisión de este gas.

De acuerdo con la concentración de amonio determinado en el suelo (**Figura 4**), se puede deducir que la emisión probablemente se deriva de este compuesto, lo cual sugiere que la nitrificación ha sido el proceso mayoritariamente responsable en la formación del N_2O (Khalil *et al.*, 2004). Ello también es corroborado por el hecho de que la humedad del suelo (EPA), en promedio, fue menor del 55 % en ambas localidades (**Figura 1**), esto es, no se presentaron las condiciones de anoxia requeridas para que ocurra la desnitrificación.

La emisión fue relativamente baja en ambas comunidades donde se desarrollaron los experimentos, probablemente por influencia de las características del suelo de las fincas donde se llevaron a cabo las determinaciones. Aunque la humedad del suelo ha sido un factor que se ha relacionado de manera positiva con los valores de emisión (Oertel *et al.*, 2016), esto no sucedió en esta investigación.

El buen drenaje del suelo franco limoso en Naranjo, así como el favorecimiento de la escorrentía superficial en San Marcos de Tarrazú, características propias del orden de suelo ubicado en cada comunidad (Andisol en Naranjo, y Ultisol en San Marcos de Tarrazú), hicieron que el EPA no sobrepasara el valor de 60 % y, en consecuencia, no favoreció la falta de oxígeno del suelo para la denitrificación y la formación del N_2O .

Debido al buen drenaje de los suelos, las condiciones anaeróbicas son raras y el potencial de denitrificación es bajo. Esto coincide con lo expresado por Tomasella *et al.* (2000), quienes mencionan que los suelos tropicales con buen drenaje emiten menos N_2O de lo que se informa para suelos templados.

De acuerdo con Gao *et al.* (2014), la producción de N_2O es óptima cuando el EPA es de alrededor del 60 %, situación que no se presentó en San Marcos de Tarrazú, y en pocas ocasiones en Naranjo (**Figura 1**), lo cual contribuyó a las bajas emisiones que se determinaron con todas las fuentes de nitrógeno.

En Naranjo, cuando se realizaron las fertilizaciones, el EPA era de aproximadamente del 55 % y no se presentaron emisiones importantes, lo cual indica que, adicionalmente, deben coincidir otras condiciones en el suelo para que se genere el gas en cantidades sustanciales. En este caso, el suministro de N, la humedad del suelo referenciada y el estímulo que pudo causar la temperatura del suelo (en promedio 21.5 °C) en la actividad microbiana, de manera conjunta, no fueron suficientes para producir grandes cantidades del gas en estudio.



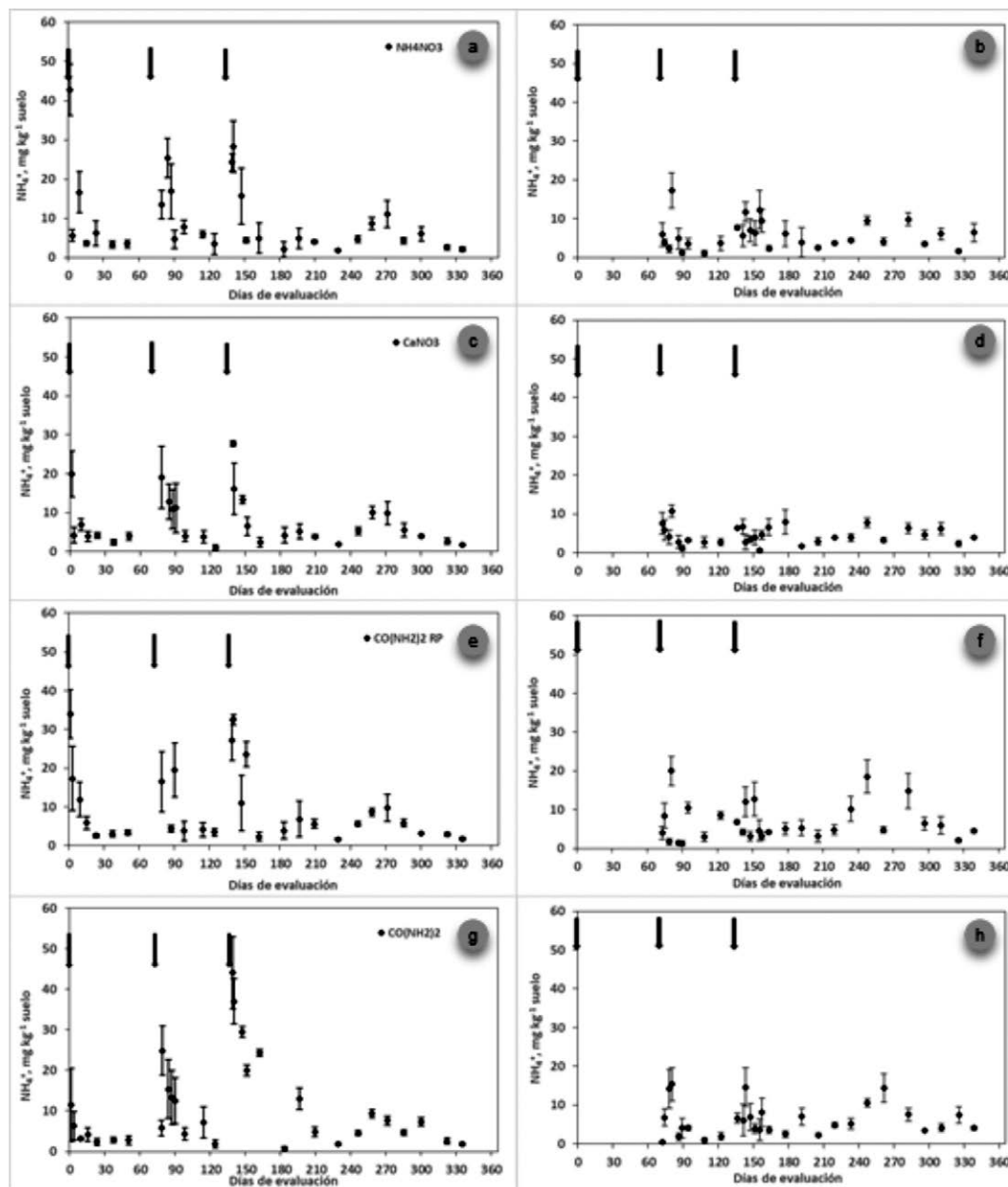


Figura 4. Contenido de amonio del suelo con diferentes fuentes de N aplicadas a plantaciones de café bajo sombra en Naranjo (a, c, e, g) y San Marcos de Tarrazú (b, d, f, h). Costa Rica. Valores promedio \pm 1 EE, flechas indican evento de fertilización.

Figure 4. Soil ammonium content with different N sources applied to shade coffee plantations in Naranjo (a, c, e, g) and San Marcos de Tarrazú (b, d, f, h). Costa Rica. Average values \pm 1 SD, arrows indicate fertilization event.



3.3 Emisión de óxido nitroso

Se determinaron diferencias en la emisión anual de este gas entre localidades, la cual fue mayor ($P < 0.0005$) en Naranjo (**Cuadro 3**). Mayor promedio anual de humedad y temperatura del suelo en Naranjo (52 % EPA y 20.0 °C), con respecto a aquellos determinados en San Marcos de Tarrazú (47 % EPA y 18.9°C), podría explicar los mayores valores de emisión observados en Naranjo.

Cuadro 3. Emisión anual de N_2O-N , $kg\ ha^{-1}$, con diferentes fuentes de nitrógeno aplicadas a café bajo sombra en diferentes comunidades, Costa Rica

Table 3. Annual emission of N_2O-N , $kg\ ha^{-1}$, with different nitrogen sources applied to shade coffee in different communities, Costa Rica

Comunidad	Emisión anual ($kg\ N_2O-N\ ha^{-1}$)
Naranjo	0.87 ± 0.06^a
San Marcos de Tarrazú	0.61 ± 0.04^b

Promedio \pm 1 error estándar (EE)

Valores con la misma letra no difieren al nivel $P < 0.05$

3.3.1 Emisión anual

Los valores de emisión para cada tratamiento dentro de cada localidad mostraron diferencias ($P < 0.0463$) solo en Naranjo, mientras que fueron similares en San Marcos de Tarrazú (**Cuadro 4**).

La emisión anual en Naranjo fue mayor con nitrato de amonio y menor ($P < 0.05$) con la urea convencional; las dos restantes fuentes de nitrógeno mostraron valores intermedios (**Cuadro 3**). En el caso de San Marcos de Tarrazú, la emisión anual mostró tendencia a ser menor cuando la forma de nitrógeno aplicada fue la urea convencional ($CO(NH_2)_2$), aunque ésta no difirió ($P > 0.05$) de las restantes fuentes.

Cuadro 4. Emisión anual de N_2O-N , $kg\ ha^{-1}$, según localidad y fuente de nitrógeno aplicado a café bajo sombra. Costa Rica

Table 4. Annual emission of N_2O-N , $kg\ ha^{-1}$, according to location and nitrogen source applied to shade coffee. Costa Rica

Tratamiento	Emisión anual $kg\ N_2O-N\ ha^{-1}$
Naranjo	
NH_4NO_3	1.00 ± 0.11^a
$CaNO_3$	0.94 ± 0.14^{ab}
$CO(NH_2)_2$ R. P.	0.87 ± 0.08^{ab}
$CO(NH_2)_2$	0.67 ± 0.07^b
San Marcos de Tarrazú	
NH_4NO_3	0.65 ± 0.05^a
$CaNO_3$	0.60 ± 0.03^a
$CO(NH_2)_2$ R. P.	0.65 ± 0.03^a
$CO(NH_2)_2$	0.57 ± 0.06^a

Valores \pm 1 EE con la misma letra no difieren al nivel.

$P < 0.05$ dentro de localidad, R. P.: Recubierta con polímeros.



En ambas comunidades, independientemente de la fuente del nitrógeno aplicado, si contiene nitrato (NO_3^-), el cual es un precursor del N_2O , la emisión tiende a ser mayor que las restantes fuentes evaluadas (**Cuadro 3**). De igual forma, la presencia de más de un precursor parece influenciar la emisión del N_2O .

Las ureas, particularmente la convencional, que requieren primariamente un proceso de hidrólisis para la formación del NH_4^+ , y posteriormente del proceso de nitrificación para la formación de óxido nitroso, mostraron tendencia a emitir menos de este gas.

La emisión del N_2O derivada de la urea convencional en Naranjo fue la menor entre las fuentes de N evaluadas, situación que coincide con lo reportado en diferentes investigaciones (Dobbie y Smith, 2003; Jones *et al.*, 2007). De acuerdo con Zanatta *et al.* (2010), las fuentes amídicas como la urea inducen menores emisiones que las nítricas, lo cual es apoyado también por los resultados obtenidos en caña de azúcar en Brasil por Signor *et al.* (2013b).

El hecho de que el primer producto de la hidrólisis de la urea sea el NH_4^+ , un compuesto que puede ser absorbido por las plantas (Velthof y Mosquera, 2011), hace que su disponibilidad disminuya antes de que pueda nitrificarse. Por ello, las fuentes de N aplicadas que contienen NO_3^- , aunque no de manera significativa y particularmente en Naranjo, mostraron tendencia a formar y emitir más N_2O que las restantes fuentes.

En consecuencia, tal y como se ha establecido en otras investigaciones (Harty *et al.*, 2016; Signor *et al.*, 2013b), el tipo de fertilizante parece influir en el comportamiento de la emisión del N_2O . En general, las fuentes de N amoniacal incrementan la emisión más lentamente que las fuentes de N nítrico, porque las últimas pueden ser desnitrificadas con rapidez y conducir a la formación del N_2O ; mientras que las fuentes amoniacales deben nitrificarse primero para luego ser desnitrificadas (Signor *et al.*, 2013). Por ello, al reducirse por absorción la disponibilidad de amonio en el suelo (Velthof y Mosquera, 2011), la cantidad remanente para que ocurra la desnitrificación, si es que las condiciones del suelo son apropiadas para ello, es baja y con ello también es baja la cantidad generada de N_2O (Hellebrand *et al.*, 2008).

En Costa Rica, investigaciones previas realizadas en el cultivo del café (Hergoualc'h *et al.*, 2008; Montenegro y Abarca, 2001; Montenegro y Herrera, 2012) reportaron mayores factores de emisión cuando utilizaron NH_4NO_3 como fuente de N. Condiciones de suelo y mayor contenido de humedad, en las anteriores investigaciones, pueden explicar estas diferencias.

3.3.2 Factor de emisión

En Naranjo, el factor de emisión fue menor ($P < 0.05$) con la urea convencional (0.27 %) en relación con aquel determinado con el nitrato de amonio (0.40 %). Las dos restantes fuentes de N (NCa y URP) mostraron valores intermedios (0.38 y 0.35 %, respectivamente) y similares entre sí y con los anteriores.

En San Marcos de Tarrazú, los factores de emisión mostraron una tendencia similar a la anterior; sin embargo, no hubo diferencia estadística entre ellos, el promedio general resultó en



0.25 %. En ambas localidades, el factor de emisión determinado para cada una de las fuentes de N evaluadas mostró ser menor al 1 % sugerido por el IPCC (2006).

Los factores de emisión determinados (0.23 – 0.40 %) son similares a los reportados por Soares (2016) en el cultivo de café, en Brasil, para la urea convencional (0.28 %) o recubierto con un polímero elástico (0.13 %), así como también a los reportados por de Klein *et al.* (2001), Galbally *et al.* (2005) y de Harty *et al.* (2016), quienes determinaron factores de emisión en el rango de 0.1 a 0.49 % del N aplicado.

4. Conclusiones

De acuerdo con las condiciones en las cuales se desarrollaron las presentes investigaciones, se concluye que la emisión del óxido nitroso sucede inmediatamente después de la aplicación del fertilizante, y disminuye a partir de la segunda-tercera semana luego de la fertilización. En ambas localidades los eventos de mayor magnitud se presentaron en la primera fertilización.

La aplicación de nitrógeno con urea convencional, comparado con el nitrato de amonio, resultó en menor emisión de óxido nitroso en Naranjo y, en general, con tendencia a emitir menos del gas en mención que las restantes fuentes. La presencia de precursores del N₂O, en la forma química del nitrógeno utilizado como fertilizante, parece influenciar la emisión de este gas, resultó mayor la emisión cuando hubo presencia de ellos, tal es el caso del nitrato de amonio. En Naranjo, la menor emisión se determinó con urea convencional y la mayor con nitrato de amonio; las dos restantes fuentes mostraron niveles intermedios de emisión. En San Marcos de Tarrazú no hubo diferencias significativas de la emisión entre las diferentes fuentes de nitrógeno evaluadas. Las lluvias parecen influenciar la emisión del N₂O, sobre todo cuando se presentan inmediatamente después de aplicado el fertilizante, ya que coincidieron eventos de emisión con los lluviosos. Basado en lo anterior, se demuestra la importancia de generar valores nacionales para los factores de emisión, y se recomienda utilizar la información generada para estimar la cantidad generada de óxido nitroso por la aplicación de fertilizante nitrogenado a plantaciones de café en zonas agroecológicas similares, cuando se usen estas fuentes y a la dosis evaluada en las presentes investigaciones.

La urea mostró una tendencia general a producir menor cantidad de óxido nitroso, por lo que su utilización podría ser una buena estrategia de mitigación, en lugar de las restantes fuentes evaluadas en plantaciones de las zonas agroecológicas, donde se realizaron las presentes evaluaciones. Además, es importante continuar con las evaluaciones de campo por al menos un año más, de manera que se pueda obtener información de la emisión del óxido nitroso sometido a la influencia cambiante del clima, el cual usualmente difiere entre años. La continuación de este tipo de evaluación por períodos mayores a un año posibilita la obtención de datos más robustos y el índice de emisión se podría extrapolar con mayor seguridad. Finalmente, se realizar este tipo de evaluación en otras zonas cafetaleras de relevancia en el país, para tener datos más específicos y de acuerdo con las condiciones agroecológicas donde estas mismas se desarrollan.



5. Agradecimientos

Esta investigación se desarrolló con el apoyo financiero parcial del BID-FOMIN, en el marco del NAMA café que se implementa en Costa Rica. Especial agradecimiento a Carlos Delgado, Andrés Hernández, Daniel Montero y Gustavo Barrantes del ICAFE, quienes apoyaron en la fase de recolección de información en el campo. Se agradece la colaboración del ICAFE, por el suministro de información de nitratos y amonio utilizados en el presente documento; de igual manera, el apoyo y facilidades dadas por FUNDECOOPERACION. Finalmente, a la Revista y a las personas revisoras anónimas por sus observaciones a la versión final del documento.

6. Ética y conflicto de intereses

El autor declara que ha cumplido totalmente con todos los requisitos éticos y legales pertinentes, tanto durante el estudio como en la producción del manuscrito; que no hay conflictos de intereses de ningún tipo; que todas las fuentes financieras se mencionan completa y claramente en la sección de agradecimientos; y que está totalmente de acuerdo con la versión final editada del artículo.

7. Referencias

- Alvarado, A., Bertsch, F., Bornemisa, E., Cabalceta, G., Forsythe, W., Henríquez, C., Mata, R., Molina, E., Salas, R. (2001). *Suelos derivados de cenizas volcánicas (Andisoles) de Costa Rica*. Asociación Costarricense de la Ciencia del Suelo ACCS.
- Akiyama, H., Tsuruta, H., Watanabe, T. (2000). N₂O and NO emissions from soils after the application of different chemical fertilizers. *Chemosphere-Global Change Science*, 2, 313-320. [https://doi.org/10.1016/S1465-9972\(00\)00010-6](https://doi.org/10.1016/S1465-9972(00)00010-6)
- Burton, D., Grant, C., Li, X. (2008). Influence of fertilizer nitrogen source and management practice on N₂O emissions from two Black Chernozemic soils. *Canadian Journal of Soil Science*, 88(2), 219-227. <https://doi.org/10.4141/CJSS06020>
- Chacón, A., Jiménez, G., Montenegro, J., Sasa, J., Blanco, K. (2012). *Inventario nacional de gases con efecto invernadero y sumideros de carbono*. IMN-MINAET.
- Chinchilla, M., Mata, R., Alvarado, A. (2011). Caracterización y clasificación de algunos ultisoles de la región de Los Santos, Talamanca, Costa Rica. *Agronomía Costarricense*, 35(1), 59-81.
- de Klein, C., Sherlock, R., Cameron, K., van der Weerden, T. (2001). Nitrous oxide emissions from agricultural soils in New Zealand—a review of current knowledge and directions for future research. *Journal of The Royal Society of New Zealand*, 31(3), 543-574. <https://doi.org/10.1080/03014223.2001.9517667>



- Di Rienzo, J., Casanoves, F., Balzarini, M., Tablada, M., Robledo, C. (2018). *Grupo InfoStat*. <http://www.infostat.com.ar>
- Dobbie, K., Smith, A. (2003). Impact of different forms of N fertilizer on N₂O emissions from intensive grassland. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 67(1), 37–46. <https://doi.org/10.1023/A:1025119512447>
- Farquharson, R. (2016). Nitrification rates and associated nitrous oxide emissions from agricultural soils – a synopsis. *Soil Research*, 54, 469-480. <https://doi.org/10.1071/SR15304>
- Fontaine, S., Bardoux, G., Abbadie, L., Mariotti, A. (2004). Carbon input to soil may decrease soil carbon content. *Ecology Letters*, 7(4), 314–320. <https://doi.org/10.1111/j.1461-0248.2004.00579.x>
- Galbally, I., Meyer, C., Bentley, S., Weeks, I., Leuning, R., Kelly, K., Phillips, F., Barker-Reid, F., Gates, W., Baigent, R., Eckard, R., Grace, P. (2005). A study of environmental and management drivers of non-CO₂ greenhouse gas emissions in Australia agro-ecosystems. *Environmental Sciences*, 2, 133-142. <https://doi.org/10.1080/15693430500395396>
- Gao, B., Ju, X., Su, F., Meng, Q., Oenema, O., Christie, P., Chen, X., Zhang, F. (2014). Nitrous oxide and methane emissions from optimized and alternative cereal cropping systems on the North China Plain: a two-year field study. *Science of The Total Environment*, 472, 112–124. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2013.11.003>
- Grace, P., Shcherbak, I., Macdonald, B., Scheer, C., Rowlings, D. (2016). Emission factors for estimating fertiliser-induced nitrous oxide emissions from clay soils in Australia's irrigated cotton industry. *Soil Research*, 54, 598–603. <https://doi.org/10.1071/SR16091>
- Halvorson, A., del Grosso S., Francesco, A. (2010). Nitrogen source effects on nitrous oxide emissions from irrigated no-till corn. *Journal of Environmental Quality*, 39(5), 1554-62. <https://doi.org/10.2134/jeq2010.0041>
- Harty, M., Forrestal, P., Watson, C., McGeough, K., Carolan, R., Elliot, C., Krol, D., Laughlin, R., Richards, K., Lanigan, G. (2016). Reducing nitrous oxide emissions by changing N fertiliser use from calcium ammonium nitrate (CAN) to urea based formulations. *Science of The Total Environment*, 563–564(1), 576-586. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.04.120>
- Hellebrand, H., Scholz, V., Kern, J. (2008). Fertilizer induced nitrous oxide emissions during energy crop cultivation on loamy sand soils. *Atmospheric Environment*, 42(36), 8403-8411. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2008.08.006>
- Hergoualc'h, K., Skiba, U., Harmand J., Hénault, C. (2008). Fluxes of greenhouse gases from andosols under coffee in monoculture or shaded by *Inga densiflora* in Costa Rica. *Biogeochemistry*, 89, 329-345. <https://doi.org/10.1007/s10533-008-9222-7>
- Holdridge, L. (1996). *Ecología basada en zonas de vida*. IICA.





- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). (2006). *Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Prepared by the National Greenhouse Gas Inventories Programme*. IGES, Japan.
- Jones, S., Rees, R., Skiba, U., Ball, B. (2007). Influence of organic and mineral N fertiliser on N₂O fluxes from a temperate grassland. *Agriculture Ecosystems & Environment*, 121(1-2), 74-83. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2006.12.006>
- Khalil, K., Mary, B., Rrenault, P. (2004). Nitrous oxide production by nitrification and denitrification in soil aggregates as affected by O₂ concentration. *Soil Biology & Biochemistry*, 36(4), 687-699. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2004.01.004>
- Linn, D., Doran, J. (1984). Effect of water-filled pore space on carbon dioxide and nitrous oxide production in tilled and nontilled soils. *Soil Science Society of America Journal*, 48, 1267-1272. <https://doi.org/10.2136/sssaj1984.03615995004800060013x>
- Montenegro, J. (2019). Respuesta polinómica de la emisión de óxido nitroso en plantaciones de café de Costa Rica. *Tropical Journal of Environmental Sciences*, 15(1), 1-24. <https://doi.org/10.15359/rca.53-2.1>
- Montenegro, J., Abarca, S. (2001). *Importancia del sector agropecuario costarricense en la mitigación del calentamiento global*. MAG-IMN. <http://cglobal.imn.ac.cr/index.php/publications/importancia-del-sector-agropecuario-costarricense-en-la-mitigacion-del-calentamiento-global/>
- Montenegro, J., Herrera, J. (2013). Emisión de óxido nitroso en el sistema de producción de café sin sombra en Costa Rica. *Tópicos Meteorológicos y Oceanográficos*, 12(1), 22-34.
- Oertel, C., Matschullata, J., Zurba, K., Zimmermann, F., Erasmi, S. (2016). Greenhouse gas emissions from soils—A review. *Chemie der Erde*, 76, 327–352. <https://doi.org/10.1016/j.chemer.2016.04.002>
- Soares, D. (2016). Emissões de gases de efeito estufa por fertilizantes nitrogenados em lavoura cafeeira irrigada. [Tese doutorado]. Universidade Federal de Lavras, Brasil.
- Signor, D., Pellegrino, C. (2013). Nitrous oxide emissions in agricultural soils: a review. *Pesquisa Agropecuária Tropical*; Goiânia, 43(3), 322-338. <https://doi.org/10.1590/S1983-40632013000300014>
- Signor, D., Cerri, C., Conant, R. (2013b). N₂O emissions due to nitrogen fertilizer applications in two regions of sugarcane cultivation in Brazil. *Environmental Research Letters*, 8, 1-9. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/8/1/015013>





- Sistani, K., Jn-Baptiste, M., Lovanh, N., Cook, K. (2011). Atmospheric emissions of nitrous oxide, methane, and carbon dioxide from different nitrogen fertilizers. *Journal of Environmental Quality*, 40, 1797-1805. <https://doi.org/10.2134/jeq2011.0197>
- Thangarajan, R., Bolan, N., Tian, G., Naidu, R., Kunhikrishnan, A. (2013). Role of organic amendment application on greenhouse gas emission from soil. *Science of The Total Environment*, 465, 72–96. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2013.01.031>
- Tomasella, J., Hodnett, M., Rossato, L. (2000). Pedotransfer functions for the estimation of soil water retention in Brazilian soils. *Soil Science Society of America Journal*, 64, 327–38. <https://doi.org/10.2136/sssaj2000.641327x>
- Velthof, G., Mosquera, J. (2011). The impact of slurry application technique on nitrous oxide emission from agricultural soils. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, Amsterdam, 140(1-2), 298-308. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2010.12.017>
- Velthof, G., Postma, O., Van Beusichem, M. (1996). Effects of type and amount of applied nitrogen fertilizer on nitrous oxide fluxes from intensively managed grassland. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 46(3), 257–267. <https://doi.org/10.1007/BF00420561>
- Zanatta, J., Bayer, C., Vieira, F., Gomes, J., Tomazi, M. (2010). Nitrous oxide and methane fluxes in South Brazilian gleysol as affected by nitrogen fertilizers. *Revista Brasileira de Ciencia do Solo*, 34, 1653-1665. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832010000500018>

